



TITLE:

原始地球の問題(<特集>地球及び惑星の内部構造について,研究会報告)

AUTHOR(S):

本田, 雅健

CITATION:

本田, 雅健. 原始地球の問題(<特集>地球及び惑星の内部構造について,研究会報告). 物性研究 1966, 7(1): 47-58

ISSUE DATE:

1966-10-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/85938>

RIGHT:

原始地球の問題

本田 雅 健 (東大物性研)

惑星と原子核*

はじめに：

地球及び惑星のなりたちについて考える場合化学者は、それらの組成の時間的な変化に興味をもつ。化学種として最も基本的なものは核種であり、放射性及非放射性核種の消長に着目して概観してみる。広範囲にわたる領域であり、未熟な部分が少なくないがあえて筆者の考えを示し問題を提起してみたい。

我々の現在手にしうる材料は大部分、地表の物質とイン石のような地球外の原始物質に近いものである。之等に太陽、星、宇宙線といった他の宇宙物質についての情報を対比させながら考えを進めてゆく。手にしうる材料について、主に放射能測定と質量分析法とを武器にして研究を進めてゆくのであるが、之等測定技術の進歩と、適用限界（感度・精度）によつておのずから限度があることを指摘したい。

昔地上の物質だけをたよりにして週期律表がつくりあげられたが（He は太陽の観測より）現在出来上つている核種の表も天然、人工のわくをはづして考えなければならない。核種の生成の問題については勿論であるが、太陽系や惑星の段階でも核種の存在度に関する既成概念は修正を求められる。以下核種の存在に影響を及ぼす因子によつて大別し、それぞれトピックスを拾つてみたい。

1. 同位体効果：

主に安定度の高い核種について問題となり核変化の現象ではないが要因の判定上常に留意しなければならない問題を含む。たとえば Li^7/Li^6 比の変化が核反応の効果によるか同位体効果によるものか判定に苦しむことがある。

a) 希ガス：地球と太陽系の元素存在度とをくらべて最も差の大きなものは H と希ガスであろう。希ガスは反応性が皆無に近いためにとりあつかいも容

* 本稿はもう少し体裁をととのえて「物理」に投稿予定

本田雅健

易である。Rayleigh蒸溜の式から示されるように、地球大気の希ガス組成が大きな変化をうけたことは容易に想像される。イン石についても地球以上に希ガスを失っており原始組成と考えられるものとは程遠い。両者の希ガスを比較してみてもよいが、イン石の方は後記のようにHe, Ne, Ar については宇宙線生成物が大部分をしめていて問題が別になつてしまう。PG が Gerling 等 (1956) 以来イン石のあるものは空間の原始気体の吸着体として働いていることがわかつてきてから思わない展開をしめしている。¹⁾その機構はともあれ最高 10^{-2} ccHe/g にも及ぶ太陽組成に近いパターンの希ガスが抽出されている。大気と最もかけはなれた例では、 $\text{He}^3/\text{He}^4=10^{-3}$, $\text{Ne}^{20}/\text{Ne}^{22}=14$, $\text{Ar}^{36}/\text{Ar}^{38}=5$ の如くであり、Ar を除いては大気と比べようがない。勿論大気の He^4 と Ar^{40} とは放射能起源 (radiogenic) であるし He^3 も宇宙線起源 (cosmogenic 又は spallogenic²⁾) とみられるから取扱いには慎重を要するが、少なくとも Ne については大気の逸散の同位体効果を示しているとみなせる。同位体の分離係数に \sqrt{M} が適用できるとし、40%の分別をおこすためには 10^{-3} の逸散による減少がおこればよい。松尾氏の解説の如く Kr, Xe が地上で分別逸散がなかつたと考えれば大気 Ne はそれらに比して略々 10^{-4} になつていることに関係づけられる。Ar については同じ筆法で分別の効果が小さい (10^{-1}) ことから説明できよう。イン石中の所謂原始気体なるものは原始組成から遠くないものであり、同位体比も大気組成のものは大巾に変動していることに着目したい。このことは後記の Xe 等の問題に関連がある。イン石中の原始 Xe が一見 $\text{Xe}^{124}-\text{Xe}^{132}$ において50%以上に及ぶ大きな質量効果を示す実験的事実に対する解釈を行う上に重要であろう。

b) 不揮発性諸金属元素： 地球のコンドライトモデルに立つて推論を行つてみる。地殻資料のうちイオン結晶をつくる金属 (lithophile) は増田氏のまとめているように、イオン半径の増大の割合より一桁上の値に相当する濃縮率でもつて地表に分別されて来ている。しかし、原始組成のものが全部地殻に集つた所で精々 10^2 の濃縮度であること、イオン半径に対する同位体効果は Li

1) O. Pepin, P. Signer, Sci., 149, 253 (1965)

2) 共によい表現ではないが屢々用いられている。

ですら常温で 10^{-3} の差にすぎないこと、この差はまた絶対温度に逆比例的に影響される（圧力依存性については不詳）等の理由によつて $\text{Li}^7 - \text{Li}^6$, $\text{Ca}^{48} - \text{Ca}^{40}$ 等についても高々 0.1% の変化が期待されるにすぎない。現在の質量分析の精度 ($\pm 1\%$ 程度) ではこのような差を見出すためには格段の努力が必要であろう。イン石と地上の物質に対して行われた数多くの研究もこの事実を裏書きしている。磁化物 (chalcophile) や (Siderophile) として存在する元素についても之迄の実験データの方は否定的である。つまり極端な場合、地球の核に濃縮している筈の Ni, Ge 白金等とは地殻に比べて 2000 倍もイン石に高いがその程度の分離能率では主に上記に準じた要因によつて効果が認められていないのであろう。酸化還元等により結合状態が著しく異なる場合や精度の高い方法の開発により将来確実な結果が得られることも期待できる。

c) 軽元素 : Hをはじめ O, C, N, S 等精度高く ($\pm 0.01\%$) 測定できるグループについては各種のデータがでてゐる。しかし之等はむしろ地表において大きな効果をうけやすいものでもあり、イン石と地殻との比較において確実な議論のできる段階に達していないといえよう。

以上要するに核壊変や核反応の効果は同位体効果から切りはなして考えられる場合が通常であり、軽い希ガスを除いては大きな影響はないといえる。

2. 放射壊変 :

他の因子によつて影響をうけ難い放射壊変は最も信頼できる年代決定法を提供しており、" 45 億年 " が我々の合言葉になつてから既に 10 年を超えている。長半減期の核の壊変現象の利用や核の安定性自体の研究の問題点を拾つてみる。

a) U, Rb 等の壊変に立脚した年代 $\text{U} \rightarrow \text{He}$, $\text{K} \rightarrow \text{Ar}$ の利用は周知のようにガスの損失による過少値を与えやすい。生成物が不揮発性の場合はこの点安心であるがそれでも、常に年代の問題に引掛つて来るいくつかの前提に留意する必要がある。才一に壊変定数は実験室的に測定されたものでなければならない。結局比放射能の絶対測定の精度にかかつてきている。 Re^{187} , Lu^{176} , U^{238} (sp. f.), $\text{Te}^{130} (\beta\beta)$ などはこの点でまだ及才点をつけるわけにはいかない。才二の問題は壊変定数の恒常性を認定していることである。測定精度が上れば

本田雅健

Pb 法と Sr 法とを比較することでチェックもされるが何分 10^9 年以上を問題とする以上この点の配慮も必要であろう。オ三には木越氏¹⁾によつて指摘されている通り、年代決定とは物質系の分化が行われた時を現在からさかのぼつて勘定している点に留意すべきである。たとえば Pb 法によつて求める場合は、U を殆んど含まない鉄イン石より Pb を抽出しこれを「原始鉛」と称している。年代はその Pb^{207}/Pb^{206} と現在のコンドライト中の Pb のそれとの比較において算出されている。このことは、金属鉄が 45 億年前にその時代の Pb を伴つて (U を伴わないで) コンドライトから分化したことを仮定している。Rb-Sr では鉄の代りに Ca-rich アコンドライトが分化してからの時間を示すにすぎない。勿論精度をおとしてよければコンドライト群のなかで相互の差異のみを利用してみたり、地表の多数の物質系の統計的処理を行つてもよい。K-Ar 法の示す最も大きな値を下限值とする等々いくらかも変法がある。しかし原始鉛とか原始 Sr といったものを直接とり出せる点では上の二つの方法に強味がある。オ四には当然のことながら、分化が終つてから物質系が閉ぢたまま保存されていなければならない。壊変生成物は recoil により結合からはずれ不安定な位置におかれることは否めない。このことは欠点でもあるが後記のように壊変生成物だけを他から分別抽出したい時に利用できれば便利である。たとえば岩石等から U^{234} が U^{238} より選択的に抽出されることが知られている。

特定の最も原始的と考えられるコンドライトについて直接年代決定のデータをつかむことも不可能ではない。都城氏の説明にある通りコンドライトは金属硫化物、カンラン石、輝石、長石等の混合体である。硫化物中に原始 Pb、燐灰石、単斜輝石、CaS 中に原始 Sr、長石等に放射 Sr と放射 Pb が濃縮されている筈であり、之等を分別することにより、之等の鉱物が分化した時間が測定される筈のものである。現在この方面の努力を試みているが、この種のデータによつてもなを 45 億をあまり超えない値に収斂する予想はつけられる。そのわけは後述の消滅放射能による知見から、広くイン石を構成する鉱物種の生成は元素生成後 1 億年に満たない間に行われたと算定されているからである。オ五には時々妙な値が報告されて戸惑うことである。鉄イン石やアコンドライト

1) 木越：「年代測定法」(1965) 紀伊国屋

トのK-Ar法によるデータは50億から100億に達するものがあり、またアコンドライト中の(原始)Ca⁴⁰が異常に低くくて100億を示唆する値であつたりする。しかし45億の壁はいかにも厚い。之を打破するためには二三の例外例をあげただけでは不充分であろう。

b) 元素の年令： 天然に見出されている放射能は今迄でも枚挙にいとまない。人工放射能と称せられているものの内最も寿命の長いものは、I¹²⁹ (t_{1/2}: 1.6-10⁷年), Cm²⁴⁷ (1.7-10⁷年), U²³⁶ (2.4-10⁷年), Pb²⁰⁵ (3-10⁷年), Pu²⁴⁴ (7.7-10⁷年)どまりである。一方天然のU²³⁵ (7-10⁸年)との間には10倍の差がある。後者より寿命の短い天然放射能は親核によつて与えられている娘核種か、核反応生成物であつて、二次的産物として片づけられてしまう。このU²³⁵とPu²⁴⁴とのギャップに一般の元素の年令を求めうることは自明といえるかも知れない。つまり天然にPu²⁴⁴がつかまえられる所から7-10⁹年を考えれば充分といえる。最近迄Cm²⁴⁷が74-10⁷年となつていたため大量の希土鉱物から抽出する試みも行われた程である。残念なことに3-10⁸年程度の放射性核種というものが存在しないので之以上この論法は進められない。一方モデルを変えて連続的なr過程による生産を考える立場にたてば最後の大規模な元素の生産は45億年の前にくらべても(?)近付いて来てよいことになる。この近付き方の程度については天文学的な立場からも10⁸年位の桁が論じられる。現在消滅してしまつて直接計数管にはかからない核種もその化石が質量分析にかけられるのでこの方面の研究が有力な情報を得させてくれる筈である。

最も割り切つた話はI¹²⁹を登場させることではじめられる。I¹²⁹が核分裂生成物中に検出され、半減期が測られて以後この核種には大きな期待が寄せられていた。その理由はI¹²⁹→Xe¹²⁹となるためであつて、大気中のXeにも充分なたしからしさでこの化石を認めうると主張されている。129に前後するXeの同位体はXe¹²⁸(1.9%)Xe¹³⁰(4.1%)でXe¹²⁹(26.4%)に比してたしかに少なすぎる。一般に奇数核種は殆んど常に隣の偶数核種の存在度を超えることはない。大気のこの偏りからみて、地球がXeを失つてI¹²⁹の残存を保持するようになった時代をI¹²⁹の誕生から算えてみる事が可能である。しかしもつと端的な実験的な証拠は再びイン石から見出された。通常のコンドライトはガスを殆んど保持していない。このような物体から抽出されたXeにあき

本田雅健

らかに Xe^{129} が空気の 50 % 以上も濃縮しているものが見出されている。二つのちがつた歴史を保存した物質系の間でこのような知見がえられたことは最も直接的な立証であり元素の年令に重要な示唆を与えるものである。もともと I^{127} (普通の I) は他の元素と同様 10^{10} 年に近い間かかつて生成したものとすると、生成効率は同じでも I^{129} はその平均寿命分だけしか留っていないから $\text{I}^{129}/\text{I}^{127} \sim 10^{-3}$ 位が出発点の存在比である。一方イン石のなかの I から来たと思われる Xe^{129} と I^{127} との比は質量分析と放射化分析法で測定され 10^{-4} の値を示した。後者はイン石が生成し Xe を失った時分の $\text{I}^{129}/\text{I}^{127}$ を示すものと考えられる。故に I^{129} の生成直後からイン石固化迄の分として I^{129} の半減期の数倍を考えればよく、約 $5 - 10^7$ 年と出て来る。この間に多少の仮定や数値を改良しても大勢には影響なく、元素の年令は惑星固化の年令と大差ないという結論になる。

c) 核種の安定度の研究 宇宙を一回限りの実験室の装置に見立てて之を利用して長半減期核種の研究を行う立場がある。既に Re^{187} , Lu^{176} 自発核分裂、二重 β 壊変等にそれらの研究例がある。天然物を扱うと屢々副産物が多すぎて困ることもある。 Xe 等希ガスについてみても大底各種の核反応の結果が重畳しており総合的判断が常に要求される。

3. 核反応 :

天然における核現象のはなやかな興亡は今日の元素核種の生成に関する考察において見られる。原始地球や原始太陽系を考えるにあたっては、一応この活劇の幕はおろされている筈である。しかし関連の深い重要な現象はいくつもありそれらが直接実験的に立証される強味があるので熱心に研究が進められている。オ一に上述の所謂消滅放射能の問題が大きくとりあげられる。いかなる材料のなかに最も端的に精確な知見が求められるかという点が残されており、 I^{129} 以外にも多数の例があげられ少しも不思議はない。オ2には星の進化に伴う固有の現象として光や電波ばかりでなく、いみじくも名付けられている宇宙線の存在がある。宇宙線は宇宙物質が宇宙の場において高エネルギーをえたものにすぎないけれども、その他に与える影響は極めて深刻であり今日之を容易に他の現象から区別してとりあげることができる。惑星物質も宇宙物質であるから

2種の宇宙物質の相互作用の化石的記録を同時に取扱うことを可能にしている。オ3にはこのように基本的に重要な知見に加えて多分に未開拓ながら之等と関連の深い諸問題が指摘されるであろう。太古の遺品のなかには我々に全く当惑を感じさせる多くのなぞをいくつも見出すことができる。また一步宇宙開発にふみ出した現状でも現代の地球外におこっている核現象について少なからぬ問題点があげられている。たとえば太陽活動に直接結びつけられる高エネルギープロトンや他の加速粒子は地球や惑星物質、宇宙塵、ロケット等に少なからぬ影響を与えていることが指摘できる。重水素や軽希元素の生成に関しては太陽系形成時に至つて名残りを留めた元素合成核反応の所産として説明が試みられており大きな刺激を与えている。

a) Extinct Radioactivity: 遠い将来には K^{40} も U^{235} も Ar^{40} , Ca^{40} Pb^{207} に変つてしまい、元のすがたをとらえることが困難になつてしまうかも知れない。しかし之等に対しても核種の存在度からみて上限値を与えることは容易になしうることである。 Cm^{247} が U^{235} を経由する以上、初期の太陽系に関しても現在から逆算した U^{235} の一部をしめていたことにはちがいはない。今日 Cm^{247} の研究は正の結果を与えてはいない。¹⁾もしU含量の極端に低い古い希土鉱物から異常に高い U^{235}/U^{238} が抽出された暁にはかなりしつかりした根拠で Cm^{247} を論ずることができると思われる。困難な原因は $I \rightarrow Xe$ の系列のように希ガスつまり大きな分離効果が関与していない点にある。 Te^{130} 以外の二重 β 壊変の研究も同様の困難がある。

最近もつと積極的に追跡されているものは当然のことながら Pu^{244} である。この自発核分裂の割合はUに比して格段に高く矢張りXeに大きな影響を与える可能性がある筈である。

実の所イン石中のXeに関しては Xe^{129} 以外のXe同位体にも異常がみられている。結論をいえば一般に原始Xeと考えられるものはどうやら大気Xeとはかなりちがつたものである。Xeのどの同位体を基準にとるかによつて観点は異なるけれどもイン石のXeの組成から大気Xeの方をながめると(Xe^{129} を別にして)重い核種つまり Xe^{136} から Xe^{131} に至る迄は大気では高くなつてい

1) 梅本春次：岡大温研報告（1965）

本田雅健

るといえる。それから軽い方では Xe^{124} をはじめとして Xe^{128} 迄大気中では逆に減少しているような分布をしめしている。この二つのことを一応別々に取扱うことができるとすると少し解釈を進めうる可能性がある。はじめの重い核種に対しては地表で自発核分裂生成物が添加されて重くなつたとすることができ¹⁾ U^{238} のみでは足りないので Pu^{244} を加えることは量的な関係を説明するためには都合がよい。仮に元素生成の幕切れにおいて I^{129} の場合と同じく $\text{Pu}^{244}:\text{U}^{238} \sim 10^{-2}$ としても、自発核分裂を行う割合は $3 \cdot 10^{-3}:5 \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^3$ であるから総合的には Pu^{244} に有利である。地球が大部分の Xe を失つてから、当初の半分位になつた Pu^{244} から発生した fissiogenic Xe を大気に放出したとすると $\text{Xe}^{131}-\text{Xe}^{136}$ の増分を説明する位は充分である。

もつと実験的に特定材料中にこの化石を見出そうとする努力もある。鉱物内に保存された fission 等に伴う局所的な構造破壊の記録を現像することによつてよみとる方法が開発されて来た²⁾。ウランや高エネルギー核反応の記録をさぐるために重要な武器となつて来ているが、この Pu^{244} の存在したことを示唆するようなデータがえられている。大きな鉄イン石の中に介在する硅酸塩鉱物とアコンドライトとについて研究された結果、格段に低い U 含量にもかかわらず、高い密度の fission track が観察されており、 Pu^{244} に帰結されねばならないというのである。 I^{129} に比べるといづれももつと直接的な又は定量的な観察がほしい所である。

もつと別の意味で重要視されているけれども、確たる証拠のないものに Al^{26} ($7 \cdot 10^5$ 年) がある。はるかに短寿命であるからいつ頃迄活躍したかわからないのではあるが、何分 $\text{Mg}-\text{Si}$ 間に位しており生成能率は悪くなかつたかも知れない。もし原始惑星の固体内で生きていたとすればおそらく熱源として重要ではなかつたかというわけである。之を非常にたよりにしている人達は、高々径 200KM の小惑星的天体でも之によつて内部を熔融することができると主張するのである。このためには $\text{Al}^{26}:\text{Si} = 2 \cdot 10^{-7}$ (10^{-4} cal/g 年) で充分であるとしている³⁾。後記のような軽希元素などが生成するような条件があれば太陽

1) P. Kuroda: Nature 187, 36 (1960)

2) R. L. Fleischer et al.: Sci., 143, 349 (1964)

3) E. Anders, Space Sci. Rev. 3, 583 (1964)

系生成時の核反応の産物としてとりあげられる可能性もあるが、何分にも寿命が短かすぎるので無理ではなかろうかと思う。

Pu²⁴⁴ や Al²⁶ 等の例からみられるように発想は単純であるが之等の実在の証拠をにぎるためには並々ならない努力が必要である。前記の Xe についてもあらゆる角度からの実験上の苦勞の末の推論であつて、仲々一筋縄ではゆかないことが思い知らされている。その軽い同位体の部分については次に述べるような宇宙線類似の核反応をイン石の側について考える必要があるとされている。

b) 宇宙線生成核種： 今日では宇宙線の記録は前節のようなあいまいさがなくよく整理された形で知られるようになって来ている。¹⁾一つには他の因子によつて左右されない強力な効果を与えていること、他には普遍的で且つ悠久な宇宙現象をよく反映して壊変定数のように恒常的な宇宙線束を記録しているため、と解することができる。またこの知識はその他の要因による核反応の解釈にも有用であり、よい練習問題を提供しているとも考えられる。

この方面の詳細は他に譲るとし、此处では最も基本的な知見の例を示すにとどめる。

宇宙線の作用は Fe-Ni に至る諸元素を標的核とする核破碎反応という形で検出することができ、そのレベルは放射能含量によつて示され、長半減期のもの程古い時代の状況を伝えている。安定同位体に落着いたものは、標的物質が表層に近くあつて空間にさらされて来た歴史の積算値を示してくれる。今徑 10 m 以上の小天体が衝突その他の原因で破壊され、空間における多数のイン石のサイズ (1 m 以下) 以下になつたとする。この時から正直に宇宙線にさらされることになる。地上に落下したときに、任意の生成物についてその生成速度 (レベル) と含量とがわかれば照射時間が算出される。このような年代は恒常的な宇宙線束と標的の不変の歴史とを前提としているが、鉄イン石では 10^9 年又はそれ以下、石質イン石では 10^7 年程度であるのが大多数である。最も古いものでも $2 \cdot 10^9$ 年であり、兎も角 $4.5 \cdot 10^9$ 年を超えないことは、前提に大した誤りをおかしていないことの証拠でもある。鉄と石との間でこのように産があるのは、石の方が空間においても衝撃に対して敏感でこわれやすいためと

1) M. Honda, J. R. Arnold: Sci., 143, 203 (1964)

本田雅健

簡単に考えられている。落下時からさかのぼつて歴史の浅い記録しかよみとれないものと説明される。宇宙旅行中におけるこの破砕についての直接的な証拠もデータを集めている内に明るみに出て来ている。同じイン石でも部分によつて別々の年代が出て来ることがある。見かけ上若い年代を与えている部分は最近部分的な破損があつたために新しく表面に出て来たものと解釈される。少くとも一度以上の破壊があつたのなら、何回かの小規模の欠損が連続したかもしれない。極端な場合には連続的な表面よりの磨耗も考えられる。 10^9 と算出されたのは実は見かけ上の effective な年代であつて実はそれこそ $4.5-10^9$ 以前に固化した大きな物体が間断なく宇宙塵や高速粒子によつてすり減つたものかもしれない。この極端なモデルを可能にするためには百万年で 1mm けずられる速度ですでに充分であろうとみられる。しかし小さなイン石についてしらべてみても昔大きな物体であつた証拠は得られていないでむしろ殆んど一定の大きさを保つたと考える方が自然な結果がえられている。つまり広範囲の安定核種についても、放射性核種についても同じような生成割合であつたことが示されている。今一つ重要な問題は宇宙線自体の恒常性についてである。之をとく鍵は化石的記録を解読する方法にしか求められるべくもない所であるが最少限 10^7 年位迄はかなり確実に一定であつたことが示されている。最も短かい半減期の核種としては P^{32} (14 日), V^{48} (16 日) が検出され、長い方では Mu^{53} ($\sim 2-10^6$ 年), Be^{10} ($2.5-10^6$ 年) がある。この間 20 ヶに及ぶ核種をしらべあげた結果半減期と生成速度との間に全く関係が認められなかつた。ということは過去においても現在も同じ強度の線束にさらされていたことを示すものにほかならない。問題は更にその先に及ぶ。極端には 10^9 年のスケールではどうかということである。このような古い記録を伝えてくれるものは K^{40} しかない。 K^{40} ($1.3-10^9$ 年) は特に 10^9 年辺りの様子を放射性核種として伝えており 10^8 年以降は安定核種と変ることではない。事実 K^{40} を利用して年代を求めてみると、他の核種から求めたものとは格別のちがひが出て来ない。我々の結論はしたがつて各測定値の信頼度の限界以内で、 10^9 年に及ぶ宇宙線の恒常性に信をおくことができるという所にある。信頼度の限界は大きな眼でみて桁ちがひになつたことはないという程度のものである。最も弱い所としては、 Be^{10} と K^{40} との間つまり 10^7-10^8 年の周期的な変化があつたとしても、之は検出

し難いし、また過去に一時的な短時間の強い照射があつても総量が小さければこの記録も埋れてしまつてゐる筈である。更にはイン石の形状に一方的な変化があつても宇宙線の変化と重なつて焦点がぼかされるおそれもある。常に念頭におくべきことは、我々が見ているのはイン石の形状と宇宙線強度との積の項であつて内味を分解して考えるときには万全の用意が必要である。

c) 太陽系内の核反応：宇宙線の影響は強力ではあるが、その量は比較的小さい。鉄イン石の場合にも計 10^{17} 核子/cm² 位であり、この結果は 10^{-8} ~ 10^{-9} 位の各生成物を結果する程度である。もつとも低エネルギー現象程収率は高く、中性子捕獲反応等では更に一桁位上廻つてゐる。さてこのような知見をふまえて、広く核に関した現象をながめてみると、前述のような希ガスの諸問題でも量的な扱いが行いやすい。定性的ながら二三の例についてあたつてみる。

FGH¹⁾によつて提出された、D, 軽希元素生成の説明は太陽系の形成時を舞台としている。したがつて現在手にしうる惑星物質について実験的な研究が可能であり凡ゆる角度から検討されてよい。宇宙線より三桁以上も上廻つたスケールの核反応を考え、原始惑星物質に核子を作作用させることによつて現在のD, Li, Be, B のすべてをつくり出すことの可能性についてである。現在迄の所イン石と地球との比較において、この現象の片鱗をうかがうことのできる証拠は残念ながら何もえられていない。総合的にみて x process はやはりまだ x らしい。原始太陽よりの惑星物質に対する照射は少くともイン石（小惑星）と地球とが分離したあとであれば当然何か歴史が残されていなければならない。Li の同位体比；熱中性子に敏感な希土の同位体比；周囲に比べて極端に存在度の低い核種、たとえば V⁵⁰ や K⁴⁰ の存在度の変化等々について検討されて来たが、いづれもこれを裏づけるものは認められていない。

イン石中のXe についての数多くのデータ²⁾ は I¹²⁹と自発核分裂とによつてのみ説明できるものとも思われぬ。他の要因としては宇宙線照射及び古代の

1) W.A.Fowler, J.L.Greenstein, F.Hoyle:

Geophys. J.Royal Astronom. Soc., 6, 148 (1962)

2) J.H.Reynolds, J.Geophys. Res. 68, 2939 (1963)

本田雅健

(F G Hの必要とするレベルをかなり下廻る程度の) 高エネルギー粒子の照射があげられる。先に不問に附したXe¹²⁴に至る軽い同位体がイン石中に濃縮していることはこのような核現象の結果として理解されるであろう。標的核としては希土Ba, Cs等があるがもしこのことを認容するならば、I, Teも加つて重い核種に対しても影響する筈である。[(p, n), (n, 2n), (n, γ), (α, n), 等] 実の所宇宙線照射量の少々高いイン石についてはXeの同位体組成が大はばに変容しているし、部分的にみてもコンドリュール等はひどく偏つた組成のXeを放出する。ちなみにコンドリュールからのXe¹²⁹は特に高い値を示している。このことはコンドリュールが歴史的に最初に固化した原始物質であるとする説には有利であるが、他のXeの説明を無視しては正しい解釈ができないと、勢い慎重にならざるをえない。

同位体効果の関与についてはあまり乗気になれないのであるが、あながち簡単にしりぞけるわけにゆかないかも知れない。たしかにKrについては何も高エネルギー反応以外の効果が示されていないけれどもKrとXeとではかなり違うのではないか。Xeは少々化学的に活性があり、物体の表面に吸着しやすい。Xeの問題はまだまだ泥沼的な様相を残しており努力すればする程抜本的な解釈が困難となつている。

さて最後になつたが、近年ロケットや人工衛星についても調査が進められるようになつた。それらの回収物についてみると宇宙線のほかに太陽プロトンの影響が色々と出て来ている。太陽活動にともなつて消長のはげしい核反応(p, n)が惹起され、また太陽表面から地球外圏にもたらされているような粒子

(H³, He³等)が人工の標的につかまえられている。将来にまつ所が多いが厚い大気に保護されていた我々には目新しい事実として重要な資料が蓄積されて来る筈である。大気のない月の表面における物質の組成は化合物、元素の単位に立つても重要であるが、一方核種の分布についても現在及び過去の放射線の影響による新知見が加えられる筈である。